

Desain dan Verifikasi Kontrol *Cascade* Pengendali Suhu Berbasis Fuzzy-PID dan PI pada *Heat Exchanger*

Yusuf Efendi, Nurhadi, Nur Alif Mardiyah, Zulfatman Has

Abstract— In industry, in controlling heat exchanger temperature, there exist some disturbances that potentially affect the performance of the heat exchanger. One of them is the change of outside temperature. This study proposes cascade control techniques with fuzzy-PID and PI methods, respectively as primary and secondary controllers to overcome the disturbance and to result more stable performance of the system. Verification on the cascade fuzzy-PID control technique showed performance of the system was improved in term of rise time (t_r), overshoot (mp), and settling time (t_s). Cascade control technique played a role in handling the changes of system parameters, while the combination of fuzzy-PID overcame the interference. The combination of feedback control and cascade control techniques with fuzzy-PID method can make the performance of the system more stable and overcome the interference.

Index Terms— cascade control, feedback control, fuzzy-PID, heat exchanger, temperature

Abstrak— Pada dunia industri terdapat beberapa gangguan yang dapat mempengaruhi kinerja sistem *heat exchanger*. Gangguan itu berupa perubahan suhu luar yang masuk ke *heat exchanger*. Untuk mengatasi sistem seperti itu diperlukan teknik kontrol yang dapat mengatasi terjadinya gangguan tersebut pada sistem. Pada penelitian ini digunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* dengan metode fuzzy-PID untuk membuat kinerja sistem lebih stabil. Hasil dari pengujian teknik kontrol *Cascade fuzzy-PID* menunjukkan bahwa kinerja performa sistem meningkat dalam hal waktu naik (t_r), lewatan maksimum (mp), dan waktu penetapan (t_s). Teknik kontrol *Cascade* berperan menangani terjadinya perubahan parameter sistem, sedangkan kombinasi fuzzy-PID berperan mengatasi terjadinya gangguan. Kombinasi teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* dengan metode fuzzy-PID mampu membuat kinerja performa sistem lebih stabil dan dapat mengatasi adanya gangguan.

Manuscript received July 31, 2019. This work was supported in part by Electrical Engineering Department University of Muhammadiyah Malang.

Y. Efendi, was undergraduate student of Electrical Engineering Department, Universitas Muhammadiyah Malang (email: yusufefendi1919@gmail.com).

Nurhadi and Nur Alif Mardiyah are with the Electrical Engineering Department, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang, Indonesia (email nurhadi@umm.ac.id, nuralif@umm.ac.id)

Zulfatman Has is with the Electrical Engineering Department, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang, Indonesia (corresponding author provide phone 0341-464318-129; email zulfatman@umm.ac.id)

Kata Kunci— kontrol cascade, kontrol feedback, fuzzy-PI, heat exchanger, suhu

I. PENDAHULUAN

HEAT exchanger merupakan instrument yang dapat mengatasi terjadinya gangguan pada *Steam supply* pada boiler [1]. Secara prinsip, ia dapat mengubah suhu air dalam tangka *heat exchanger* sebagai *variable* yang dikontrol (*controlled variable*). gangguan yang terjadi dalam *heat exchanger* ini biasanya terdapat pada *controlled variable* (suhu air) dan tekanan *steam supply*. Dalam mengatasi gangguan tersebut [2] menggunakan Neuro-PID untuk mengontrol suhu *superheated steam*.

Sebelumnya banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengembangkan metode pemodelan dalam mengatasi gangguan *heat exchanger* tersebut di atas [3] menggunakan control PID (Proportional, Integral, dan Derivative) untuk mengontrol suhu *heating furnace* dengan menggunakan beberapa metode perbandingan [4]. Dalam menangani gangguan, *cascade control* [5] masih populer dan digunakan dalam sistem kontrol *heat exchanger*. Permasalahan yang sering muncul dalam dalam sistem *heat exchanger* ini adalah terjadinya perubahan parameter dan adanya gangguan.

Dalam mengatasi problematika di atas diperlukan teknik kontrol yang mampu mengkompensasi permasalahan tersebut, yakni salah satunya dengan teknik kontrol *cascade* [6]. Serta dalam menangani gangguan, dapat menggunakan metode yang paling sering digunakan dalam meredam gangguan yaitu metode *Disturbance Observer* (DOB)[7]. Adapun metode lain gabungan kontrol *cascade* dengan kombinasi metode Fuzzy-PID [8],[9].

Dengan demikian, studi ini bertujuan untuk memodelkan motor servo menggunakan teknik *System Identification Toolbox* (SIT) [10] pada MATLAB sebagai *plant* sistem *heat exchanger*. Merancang sistem *heat exchanger* dengan kontrol *feedback* dan kontrol *cascade fuzzy-PID*, dan mengimplementasikan sistem kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* pada *plant* sistem *heat exchanger*. Penggunaan *cascade* diharapkan dapat menjadi alternatif kontroler dalam mengendalikan suhu pada system *heat exchanger*, khususnya dalam mengatasi keberadaan gangguan yang bersumber dari luar system.

II. METODE PENELITIAN

A. Pemodelan Heat exchanger

Untuk mendapatkan model control yang tepat sesuai dengan yang diinginkan maka perlu diketahui tentang karakteristik plant, dimana diperlukan pemodelan plant yang sudah dikaji serta dilakukan penelitian sebelumnya. Untuk model heat exchanger dalam penelitian ini merujuk pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan [11] pada persamaan (1) yang telah di sederhanakan berikut ini:

$$TFc = \frac{1}{30s+1} \quad (1)$$

B. Pemodelan Motor servo

Pemodelan motor servo dilakukan dengan mengambil data input dan data output dari motor servo. Pemodelan motor servo ini dilakukan dengan bantuan SIT pada MATLAB. Dimana model motor servo tersebut diperlukan untuk perancangan system pengendali suhu heat exchanger. Langkah-langkah dalam pemodelan ini antara lain pengambilan data, pemilihan struktur pemodelan, estimasi dan validasi. Pada langkah pengambilan data, akan diambil data input dan output dari motor servo. Data input diambil dari data yang telah dibuat oleh penulis, sedangkan data output diambil dari data pembacaan rangkaian control pada motor servo terhadap masukan yang diberikan. Data input dan output dapat dilihat dalam Gambar 1.

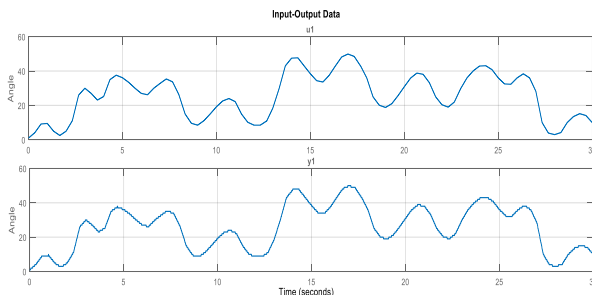


Fig. 1. Data input output

Pada langkah pemilihan struktur pemodelan, penelitian ini akan menggunakan pemodelan *transfer function* dengan *zeros* bernilai 1 dan *poles* bernilai 2. Untuk langkah yang terakhir adalah langkah estimasi dan validasi akan diketahui nilai ketetapan hasil pemodelan dari pemilihan struktur pemodelan. Dari hasil estimasi pemodelan *transfer function*, menghasilkan nilai ketepatan mencapai 97.78%, seperti pada kurva validasi Gambar 2. Nilai ketepatan sebesar 97.78% menunjukkan bahwa hasil estimasi dari pemodelan dapat digunakan untuk perancangan sistem yang akan dibuat, karena nilai tersebut sudah memenuhi kriteria ketepatan hasil estimasi yakni harus lebih besar sama dengan 90%.

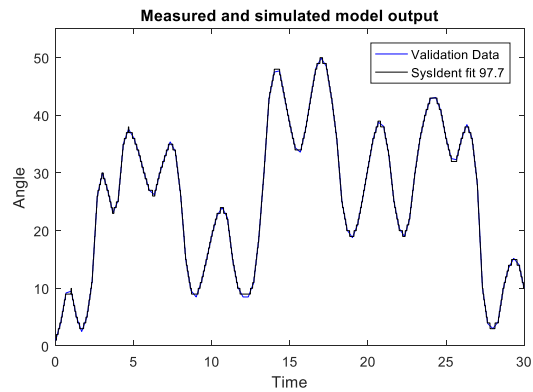


Fig. 2. Kurva validasi

Dari identifikasi sistem diperoleh pemodelan dalam bentuk *transfer function*, sehingga didapatkan persamaan 2:

$$TFc = \frac{Num}{Den} = \frac{376s+583.3}{s^2+377.2s+583.2} \quad (2)$$

C. Perancangan Kontrol feedback dan Kontrol cascade

Desain pengaturan control *cascade* dilakukan sebagai penelitian pendahuluan mengenai perubahan respon sistem dan respon sistem terhadap gangguan. Blok pengaturan menggunakan kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* pada sistem *heat exchanger* seperti dalam Gambar 3 dan Gambar 4.

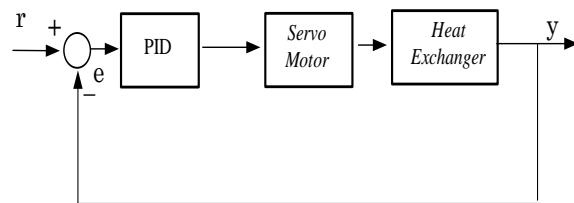


Fig. 3. Blok kontrol feedback

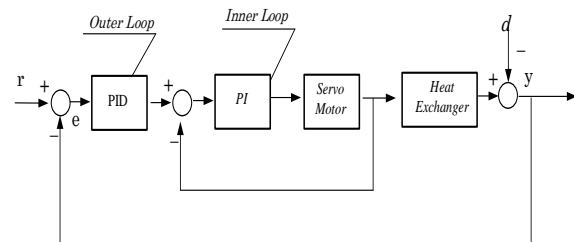


Fig. 3. Blok kontrol cascade dengan gangguan

Dalam Gambar 3 dan Gambar 4 terlihat bagaimana konfigurasi pengujian sistem menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* dengan disertai gangguan pada sistem.

D. Perancangan Kontrol Cascade fuzzy-PID

Penggunaan kontrol *cascade fuzzy-PID* digunakan untuk mendapatkan hasil respon keluaran sistem *heat exchanger* lebih baik dan stabil kinerja performa sistem tersebut.

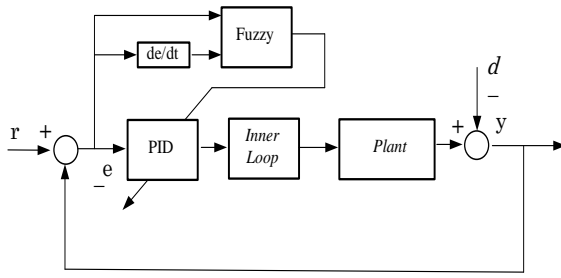


Fig. 5. Blok kontrol Cascade fuzzy-PID

Gambar 5 menunjukkan konfigurasi pengujian sistem menggunakan kontrol *cascade fuzzy-PID*. Metode kontrol *cascade fuzzy-PID* ini digunakan untuk mengatasi adanya gangguan pada sistem agar sistem lebih stabil. . Masukan dari kontrol *fuzzy* ini ada dua yaitu nilai *error* $error(t)$ dan turunan pertama dari nilai *error* $dError(t)$, dengan tiga *output* untuk setiap parameter dari kontrol PID K_p , K_i , dan K_d . Rentang variabel parameter parameter K_p , K_i , dan K_d dari kontrol PID adalah $[K_p \min, K_p \max]$, $[K_i \min, K_i \max]$, $[K_d \min, K_d \max]$. Nilai rentang dari variabel tersebut ditentukan berdasarkan dari percobaan sistem dengan kontrol PID dengan efisiensi tertinggi.

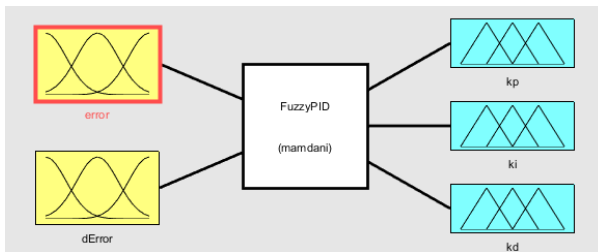


Fig. 6. Blok kontrol infrensi fuzzy

Gambar 6 menunjukkan inferensi metode *fuzzy*, yang mana inferensi tersebut menunjukkan dua *input* dan tiga *output* untuk sistem yang akan dikontrol. Metode *fuzzy* yang digunakan pada penelitian ini meggunakan metode *fuzzy* mamdani. Kisaran nilai dari setiap parameter adalah $K_p \in [0.31, 3.1]$, $K_i \in [0.016, 0.16]$, $K_d \in [0.1, 1]$. Penentuan parameter kontrol PID seperti pada Persamaan 3, 4, dan 5.

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p \min}}{K_{p \max} - K_{p \min}} = \frac{K_p - 0.31}{3.1 - 0.31} \quad (3)$$

$$K'_i = \frac{K_i - K_{i \min}}{K_{i \max} - K_{i \min}} = \frac{K_i - 0.016}{0.16 - 0.016} \quad (4)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d \min}}{K_{d \max} - K_{d \min}} = \frac{K_d - 0.1}{1 - 0.1} \quad (5)$$

Sehingga nilai parameter yang dihasilkan adalah $K_p = 2.79K'_p + 0.31$, $K_i = 0.144K'_i + 0.016$, dan $K_d = 0.9K'_d + 0.1$. Fungsi keanggotaan dari input fuzzy seperti pada Gambar 7 dan 8. Kisaran masukan ini dari 0 sampai 50 merupakan suhu yang terdapat pada heat exchanger dari suhu normal sampai suhu tertinggi yakni 50°C . Nilai masukan tersebut akan dibagi dalam 5 tingkat variabel linguistik. Dipilih 5 tingkat variabel linguistik karena tingkat variabel linguistik tersebut paling optimal untuk sistem. Tingkat variabel linguistik yang dipakai adalah NB: Negative Big, NS: Negative

Small, ZE: Zero, PS: Positive Small, dan PB: Positive Big.

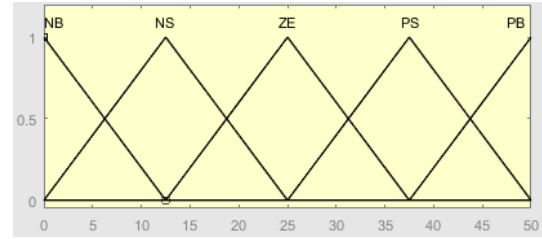


Fig. 7. Keanggotaan dari error(t)

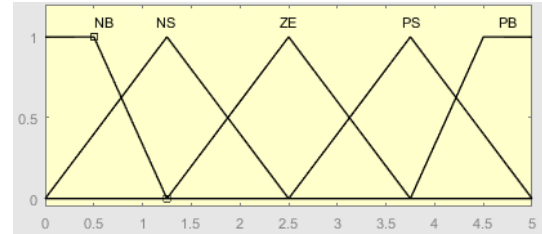


Fig. 8. Keanggotaan dari dError(t)

Fungsi keanggotaan dari K'_p , K'_i , dan K'_d , ditunjukkan pada Gambar 9. Tingkat linguistik output yang dipakai adalah S : *Small*, MS : *Medium Small*, M : *Medium*, MB : *Medium Big*, B : *Big*, dimana nilai rentangnya dari 0 ke 1. Pemilihan nilai rentang dari 0 ke 1 karena nilai tersebut menunjukkan hasil yang optimal pada kinerja sistem. Dipilih 5 tingkat linguistik *output* untuk parameter K'_p , K'_i , dan K'_d juga karena dengan tingkatan linguistik tersebut kinerja dari sistem menunjukkan hasil yang optimal.

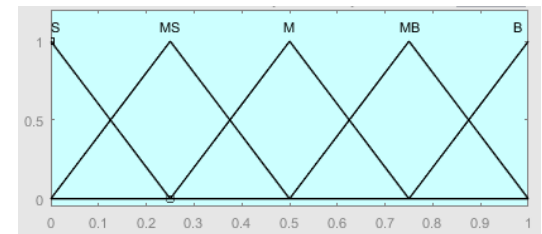
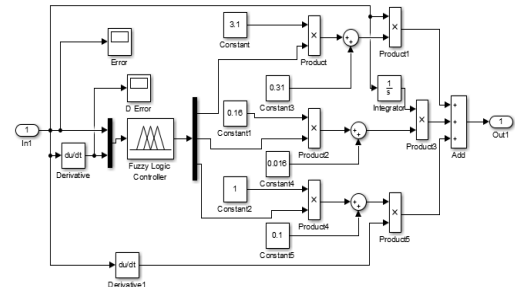
Fig. 9. Keanggotaan dari K'_p , K'_i , dan K'_d 

Fig. 10. Blok simulink AFPID

Gambal 10 merupakan blok simulink kontrol FPID untuk sistem *heat exchanger*. Gambar 10 dapat diketahui bagaimana pengadaptasian kontrol PID menggunakan metode *fuzzy*. Dari pengaturan *fuzzy* atas variabel *input* dan *output*, aturan *fuzzy* dapat di representasikan seperti terlihat pada Tabel 1 dan disusun dengan aturan *if-then* sebagai berikut:

Aturan i : if $e(t)$ is A_{1i} and $de(t)$ A_{2i} then $K'_p = B_i$ and $K'_i = C_i$ and $K'_d = D_i$. Dimana $i = 1, 2, 3, \dots, n$, dan n adalah nomor dari pada aturan. Dari tabel, didapat 5 variabel sebagai *input* dan 5 variabel sebagai *output*,

maka dalam desain didapat 25 aturan *fuzzy*. Penentuan tingkat linguistik output dihasilkan berdasarkan tingkat linguistik *error* dan perubahan *error* terlihat pada Tabel 1.

TABLE I
ATURAN FUZZY

de/e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	S	S	MS	MS	M
NS	S	MS	MS	M	MB
ZE	MS	MS	M	MB	MB
PS	MS	M	MB	MB	B
PB	M	MB	MB	B	B

E. Perancangan Pengujian

Sebelum melaksanakan pengujian terhadap perancangan-perancangan yang telah dibuat, terlebih dahulu diperlukan langkah-langkah awal supaya pengujian dapat dilakukan. Persiapan-persiapan yang perlu dilakukan antara lain, perancangan antar muka, perancangan pengujian model *heat exchanger*.

Perancangan anatar muka diperlukan sebagai penghubung antara *software* MATLAB yang berada pada *Personal Computer* (PC) dengan *plant* yang akan diuji. Antar muka yang dipakai adalah menggunakan Arduino Mega2560.

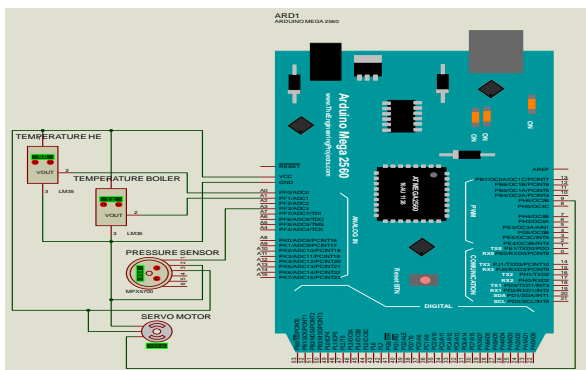


Fig. 11. Rangkaian Antar Muka Sistem

Gambar 11 merupakan konfigurasi antar muka dengan plant. Dalam rangkaian antar muka tersebut terdiri dari Arduino Mega2560 sebagai antar muka, motor servo, sensor suhu LM35 dan sensor tekanan uap MPX5700PA. Pengujian model sistem *heat exchanger* dilakukan untuk mengetahui respon ketika diuji menggunakan sistem *open loop* dan *close loop*. Gambar 12 dan 13 merupakan blok simulink model sistem *heat exchanger* yang diuji pada *open loop* dan *close loop*.

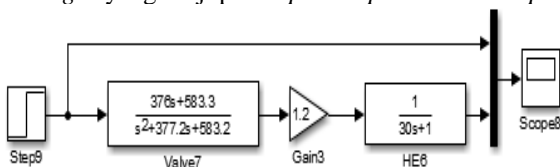


Fig. 12. Blok simulink sistem heat exchanger open loop

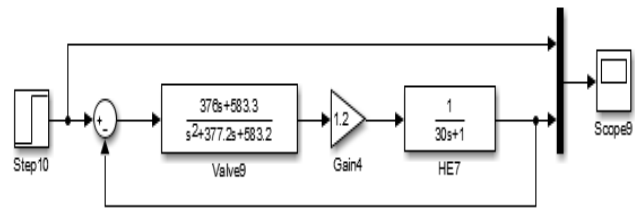


Fig. 13. Blok simulink sistem *heat exchanger close loop*

Pengujian sistem *heat exchanger* pada Gambar 14 menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* akan di analisa respon yang dihasilkan. Beberapa aspek yang akan di analisa pada hasil percobaan ini antara lain, respon waktu naik (t_r), *overshoot* (m_p), *peak time* (t_p). Berikut blok simulink pengujian kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* PID.

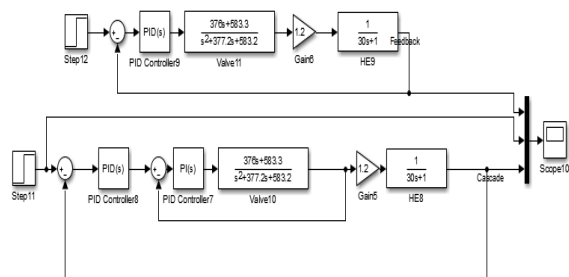


Fig. 14. Blok simulink kontrol *feedback* dan kontrol *Cascade* PID

Pengujian sistem *heat exchanger* pada Gambar 15 menggunakan teknik kontrol *cascade* PID dan kontrol *cascade Fuzzy-PID* dengan gangguan akan di analisa respon yang dihasilkan. Beberapa aspek yang akan di analisa pada hasil percobaan ini antara lain, respon waktu naik (T_r), *overshoot*, *peak time*, dan performa teknik kontrol terhadap adanya gangguan. Berikut blok simulink untuk pengujian teknik kontrol *cascade* PID dan kontrol *cascade Fuzzy-PID* dengan gangguan.

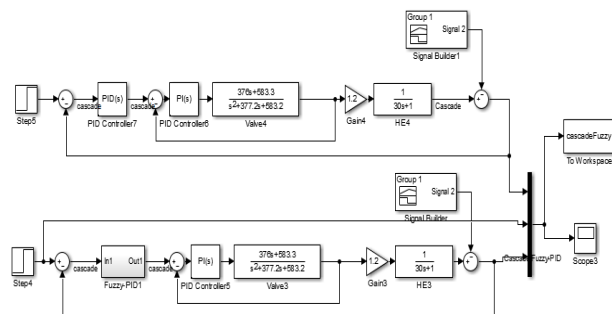


Fig. 15. Blok simulink teknik kontrol *cascade* PID dan kontrol *cascade* Fuzzy-PID dengan gangguan

Pengujian sistem *test-rig heat exchanger* pada Gambar 16 menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* akan di analisa respon yang dihasilkan. Beberapa aspek yang akan di analisa pada hasil percobaan ini antara lain, respon waktu naik (T_r), *overshoot*, *peak time*. Berikut blok simulink untuk pengujian verifikasi *test-rig* teknik teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade*.

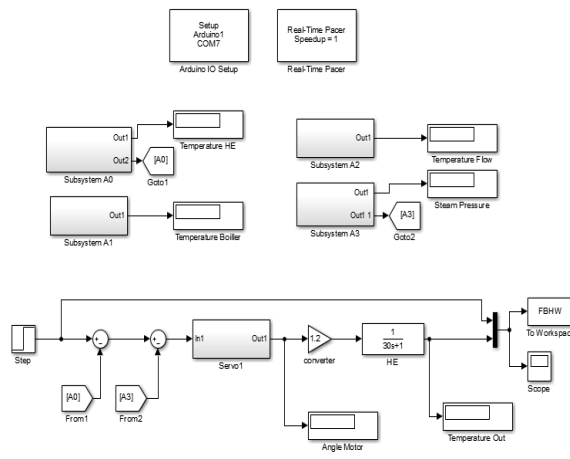


Fig. 16. Blok simulink verifikasi *test-rig* teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sistem Heat Exchanger Menggunakan Open Loop dan Close Loop

Hasil pengujian sistem *heat exchanger* menggunakan *open loop* dan *close loop* dapat dilihat pada Gambar 17 dan Gambar 18 di bawah ini.

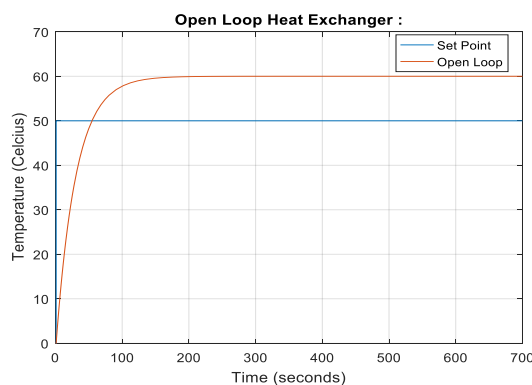


Fig. 17. Respon transien system *heat exchanger open loop*

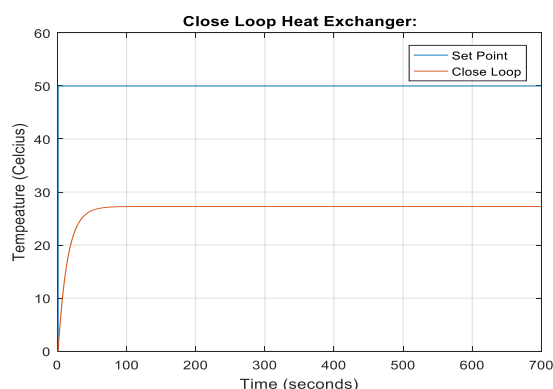


Fig. 18. Respon transien system *heat exchanger close loop*

Dari hasil pengujian pada sistem *heat exchanger* dapat dilihat bahwa respon dari model dengan *input* berupa sinyal *step* pada sistem *close loop* menghasilkan respon yang tidak dapat dikendalikan atau tidak stabil, karena tidak adanya koreksi nilai keluaran yang dihasilkan oleh sistem. Sedangkan pada pengujian dengan sistem *close loop* menghasilkan respon yang stabil, karena pada sistem *close loop* adanya koreksi

nilai *error* terhadap keluaran yang dihasilkan sistem. Nilai *error* tersebut didapatkan dari selisih nilai referensi *input* dengan nilai keluaran sistem.

Respon yang dihasilkan dari sistem *open loop* tidak stabil atau tidak sesuai dengan nilai referensi *input*. Berbeda dengan hasil pengujian pada sistem *close loop* yang menunjukkan respon yang stabil dan nilai keluaran tidak jauh berbeda dari nilai referensi *input*.

B. Hasil Pengujian Sistem Heat Exchanger Kontrol Feedback dan Kontrol Cascade PID

Hasil Pengujian sistem *heat exchanger* menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade PID* akan di analisa respon yang dihasilkan. Beberapa aspek yang akan di analisa pada hasil percobaan ini antara lain, respon waktu naik (t_r), *overshoot* (m_p), *peak time* (t_p). Hasil pengujian sistem *heat exchanger* menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade PID* didapatkan hasil seperti Gambar 19 dibawah ini.

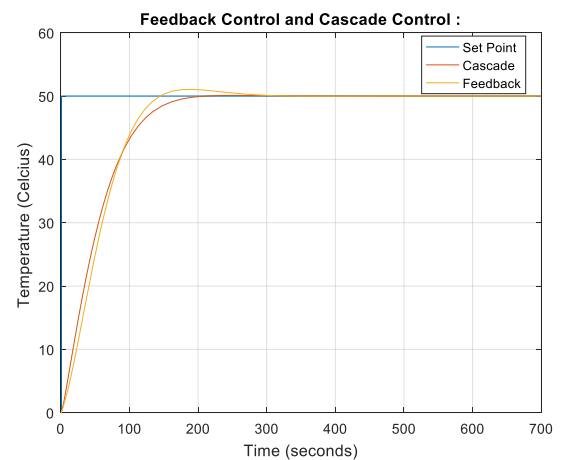


Fig. 19. Respon keluaran sistem *heat exchanger* menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *cascade PID*

Gambar 19 merupakan respon keluaran sistem *heat exchanger* yang menggunakan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *Cascade PID*. Respon keluaran sistem dengan teknik kontrol *feedback* dan kontrol *Cascade PID* pada pengendalian sistem *heat exchanger* didapatkan hasil performa yang berbeda. Respon keluaran sistem pada aspek waktu naik dalam mencapai *setpoint*, Teknik kontrol *cascade PID* lebih baik dari pada teknik kontrol *feedback*. Dalam aspek *overshoot* dan *peak time*, respon keluaran sistem yang dihasilkan teknik kontrol *cascade PID* juga lebih baik dari pada kontrol *feedback*. Pada percobaan ini juga dapat diketahui karakteristik dari respon transien seperti pada Tabel 2.

TABLE II
KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN KONTROL FEEDBACK DAN KONTROL CASCADE PID

	Feedback	Cascade PID
RiseTime	15.6062	18.2179
Overshoot	2.1135	0.1941
Undershoot	0	0
Peak	51.0568	50.0971
PeakTime	116	120

Pada Tabel 2 diketahui karakteristik sistem dengan kontrol *feedback* dan *cascade* PID dalam sisi respon transiennya. Perbedaan respon waktu naik yang dihasilkan oleh kontrol *feedback* lebih cepat mencapai *setpoint* dari pada respon waktu naik yang dihasilkan oleh kontrol *cascade* PID. Respon dari kontrol *cascade* PID juga menghasilkan nilai *overshoot* dan *peak time* yang lebih baik dari pada kontrol *feedback*. Penggunaan teknik kontrol *cascade* PID mampu menunjukkan performa yang lebih baik dari pada teknik kontrol *feedback*.

C. Hasil Pengujian Sistem Heat Exchanger Kontrol Cascade PID dan Kontrol Cascade Fuzzy-PID dengan Gangguan

Hasil Pengujian sistem *heat exchanger* menggunakan teknik kontrol *cascade* PID dan kontrol *cascade* Fuzzy-PID dengan gangguan akan di analisa respon yang dihasilkan. Beberapa aspek yang akan di analisa pada hasil percobaan ini antara lain, respon waktu naik (t_r), *overshoot* (m_p), *peak time* (t_p), dan performa teknik control terhadap adanya gangguan. Hasil pengujian sistem *heat exchanger* menggunakan teknik kontrol *cascade* PID dan kontrol *cascade* Fuzzy-PID dengan gangguan didapatkan hasil seperti Gambar 20 di bawah ini.

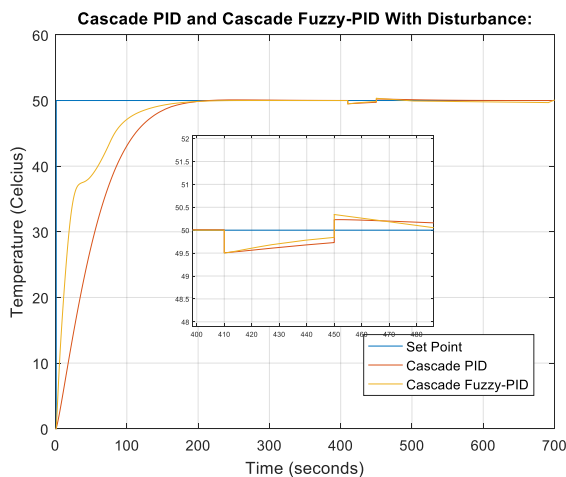


Fig. 20. Respon keluaran sistem heat exchanger menggunakan teknik kontrol cascade PID dan kontrol cascade Fuzzy-PID dengan gangguan

Gambar 20 merupakan respon keluaran sistem *heat exchanger* yang menggunakan teknik kontrol *Cascade* PID dan kontrol *Cascade* Fuzzy-PID, dengan menyertakan gangguan pada proses pengujian sistem. Respon keluaran sistem dengan teknik kontrol *Cascade* PID dan kontrol *Cascade* Fuzzy-PID pada pengendalian sistem *heat exchanger* didapatkan hasil performa yang berbeda. Respon keluaran sistem pada aspek waktu naik dalam mencapai *setpoint*, Teknik kontrol *cascade* Fuzzy-PID lebih baik dari pada teknik kontrol *cascade* PID. Dalam aspek *overshoot* dan *peak time*, respon keluaran sistem yang dihasilkan teknik kontrol *cascade* Fuzzy-PID juga lebih baik dari pada kontrol *cascade* PID. Pada percobaan ini juga dapat diketahui karakteristik dari respon transien seperti pada Tabel 3.

TABLE II
KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN TEKNIK KONTROL CASCADE PID DAN KONTROL CASCADE FUZZY-PID DENGAN GANGGUAN

	Cascade PID	Cascade Fuzzy-PID
RiseTime	18.4646	7.7558
Overshoot	0.4574	0
Undershoot	0	0
Peak	50.2287	50.2160
PeakTime	120	50.0419

Pada Tabel 3 diketahui karakteristik sistem dengan kontrol *cascade* PID dan *cascade* Fuzzy-PID dalam sisi respon transiennya. Perbedaan respon waktu naik yang dihasilkan oleh kontrol *cascade* Fuzzy-PID lebih cepat mencapai *setpoint* dari pada respon waktu naik yang dihasilkan oleh kontrol *cascade* PID. Respon dari kontrol *cascade* Fuzzy-PID juga menghasilkan nilai *overshoot* dan *peak time* yang lebih baik dari pada kontrol *cascade* PID. Penggunaan teknik kontrol *cascade* Fuzzy-PID mampu menunjukkan performa yang lebih baik dari pada teknik kontrol *cascade* PID.

D. Hasil Pengujian Verifikasi Test-Rig Sistem Heat Exchanger Kontrol Feedback dan Kontrol Cascade

Hasil pengujian verifikasi *test-rig* sistem *heat exchanger* dapat dilihat pada Gambar 21 di bawah ini.

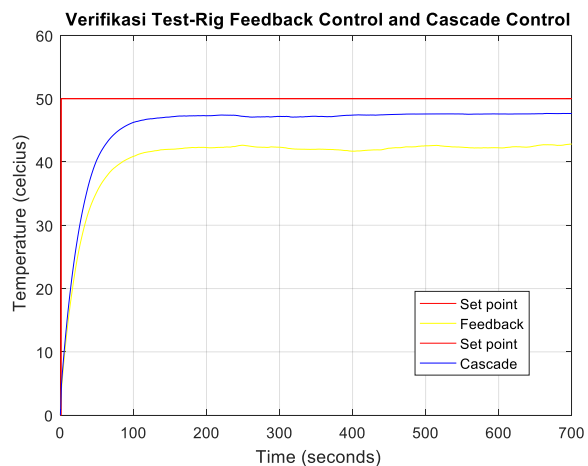


Fig. 21. Respon keluaran verifikasi test-rig sistem heat exchanger menggunakan teknik kontrol feedback dan kontrol cascade

Dari hasil pengujian pada verifikasi *test-rig* sistem *heat exchanger* dapat dilihat bahwa respon dari model dengan *input* berupa sinyal *step* pada sistem kontrol *cascade* lebih menghasilkan respon yang stabil dari pada hanya menggunakan kontrol *feedback*, karena tidak adanya koreksi konfersi nilai *input* keluaran yang dihasilkan oleh sistem. Dengan adanya kontrol *cascade* respon keluaran pada sistem *outter* yang kurang stabil di perbaiki oleh sistem *inner* pada kontrol *cascade*, sehingga respon keluaran sistem lebih stabil dengan adanya kontrol *cascade* ini. Dari hasil verifikasi *test-rig* system *heat exchanger* dengan menggunakan kontrol *feedback* dan kontrol *cascade* juga didapatkan respon waktu naik (Tr) = 3.4933, *overshoot* = 19.00, *settling time* = 112 detik.

IV. KESIMPULAN

Perancangan dan verifikasi sistem kontrol cascade berbasis fuzzy-PID dan PI untuk pengaturan suhu sistem heat exchanger telah berhasil dilakukan. Perancangan kontrol cascade menggunakan metode fuzzy-PID sebagai primary controller dan PI sebagai secondary controller didapatkan hasil yang lebih baik, dari pada sistem kontrol feedback, terlihat dari respon keluaran rise time = 7.7558 detik dan overshoot = 0 %, serta rise time = 18.4646 detik dan overshoot = 0.4574 %, masing-masing untuk simulasi dan eksperimental. Penggunaan metode cascade terbukti mampu mengatasi terjadinya respon keluaran yang kurang maksimal menjadi respon keluaran yang stabil.

REFERENSI

- [1] [1] P. Nowak and J. Czebot, "Observer-Based Cascade Control of the Heat Distribution System," pp. 633–638, 2013.
- [2] [2] J. Zhang, F. Zhang, M. Ren, G. Hou, and F. Fang, "Cascade control of superheated steam temperature with neuro-PID controller," *ISA Trans.*, vol. 51, no. 6, pp. 778–785, 2012.
- [3] [3] Y V Pavan Kumar, "Cascaded PID Controller Design for Heating Furnace \nTemperature Control," *IOSR J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 76–83, 2013.
- [4] [4] Z. Wu, D. Li, and L. Wang, "Control of the superheated steam temperature: A comparison study between PID and fractional order PID controller," *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2016–August, no. 1, pp. 10521–10526, 2016.
- [5] [5] C. Xiuying, G. Tao, L. Hengzhi, and Z. Jin, "Adaptive cascade generalized predictive control," *Proc. 28th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2016*, no. July, pp. 494–499, 2016.
- [6] [6] F. Firmansyah and I. A. Sulistyawan, "Temperature Control for a Pasteurization Miniplant using Multiloop and Cascade Controllers," pp. 32–37, 2016.
- [7] [7] L. T. Pengaturan and J. T. Elektro-fti, "PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI DISTURBANCE OBSERVER SIMULATOR MESIN FREIS Ali Fatoni , Josaphat Pramudijanto , Alfius Yonatan," pp. 1–7, 2003.
- [8] [8] Y. Cao, C. Zhong, and K. Qiu, "Design and Experiment About Temperature Control System Of Sealing Machine Based On Fuzzy PID," 2016.
- [9] [9] Z. Has, A. H. Muslim, and N. A. Mardiyah, "Adaptive-Fuzzy-PID Controller Based Disturbance Observer for DC Motor Speed Control," no. September, pp. 19–21, 2017.
- [10] [10] Zulfatman and M. F. Rahmat, "Application of Self-Tuning Fuzzy Pid Controller on Industrial Hydraulic Actuator," *Nternational J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 246–261, 2009.
- [11] [11] E. Ezzat Ismail and O. M. ElSaid, "Improving the Performance of Heat Exchanger System by better Control Circuits," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 121, no. 11, pp. 975–8887, 2015.